



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODELÝ MATERIÁLŮ PRO SIMULACI DYNAMICKÝCH DĚJŮ VE TVÁŘENÍ

MATERIAL MODELS FOR SIMULATION OF DYNAMIC FORMING OPERATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ZDENĚK FIALA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV ŠLAIS

BRNO 2008

ABSTRAKT

FIALA Zdeněk: Modely materiálů pro simulaci dynamických dějů ve tváření.

Bakalářská práce obsahuje základní informace o modelech materiálů pro simulace dynamických dějů ve tváření. Popisuje simulační software založený na metodě konečných prvků a jeho využití při simulaci dynamických dějů ve tváření. Uvádí základní teorii o mechanických vlastnostech materiálu a způsoby jejich zjišťování při dynamických podmínkách zatěžování. Srovnává jednotlivé konstitutivní rovnice, které vystihují chování materiálu v závislosti na teplotě a rychlosti deformace.

Klíčová slova:

simulace, model výpočtu, dynamický děj, metoda konečných prvků, tváření

ABSTRACT

FIALA Zdeněk: Material models for simulation of dynamic forming processes.

The work deals with basic information about material models for simulation of dynamic forming processes. It describes software based on the finite element method and its use for simulation of dynamical forming processes. Next it presents basic theories about mechanical behaviour of materials under dynamical loading conditions and their evaluation. It compares constitutive equations which describe material behaviour depended on temperature and strain rate.

Keywords:

simulation, mathematical model, dynamic process, finite element method, forming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIALA Zdeněk: *Modely materiálů pro simulaci dynamických dějů ve tváření*. Brno, 2008. 25 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Miroslav Šlais. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 10.5.2000


.....
Zdeněk Fiala

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Miroslavu Šlaisovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	1
2. Základní pojmy	2
2.1 Počítačová simulace	2
2.2 Modelování	7
2.3 Model výpočtu	7
2.4 Napětí	8
2.5 Deformace	10
2.6 Přetvárný odpor	11
2.7 Rychlost deformace	12
3. Mechanické vlastnosti materiálu	13
4. Metoda konečných prvků	15
4.1 Základní charakteristika metody	16
4.2 Použití MKP	16
5. Systémy a prostředky FEA – simulace	17
5.1 Univerzální systémy	17
5.1.1 ANSYS	17
5.1.2 QuickField	18
5.1.3 MARC	18
5.2 Speciální systémy	18
6. Metody zjišťování dynamicko-mechanických vlastností materiálů	19
6.1 Taylorův test	19
6.2 Hopkinsonův test	20
7. Konstitutivní rovnice	21
7.1 Experimentální ověření platnosti konstitutivních rovnic	21
7.2 Johnson-Cookova rovnice	22
7. ZÁVĚRY	23

Seznam použitých zdrojů

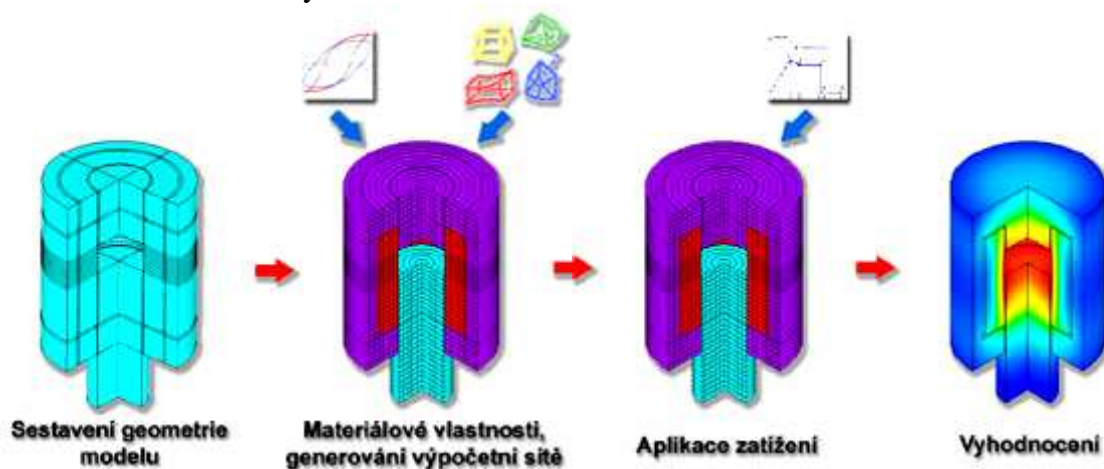
Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

1. Úvod

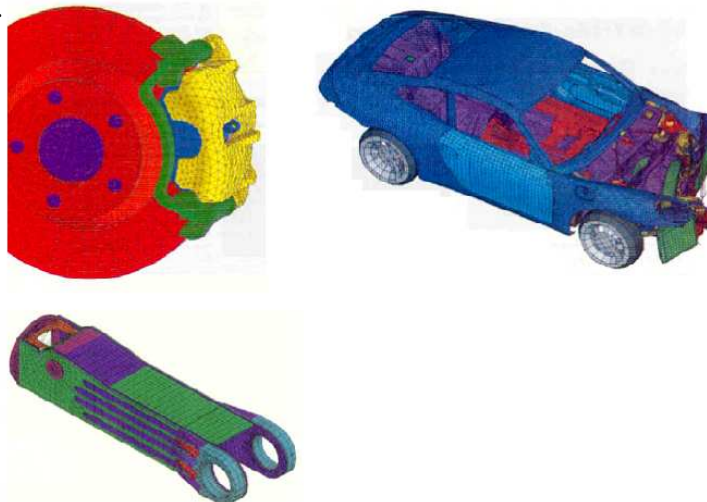
V poslední době umožnil vývoj výpočetní techniky i rozvoj nejrůznějších simulačních a modelovacích softwarů. Ty se využívají v nejrůznějších vědních disciplínách od technologie přes geologii po medicínu. Jejich velkou předností je, že lze daný problém nasimulovat nanečisto před spuštěním výroby nebo zavedením nových technologií. Práce se softwarem navíc není příliš náročná a tudíž neklade příliš velké nároky na obsluhu.

Simulování dějů se provádí zejména za účelem úspory peněz a času. Snaha o snižování nákladů na testování a výrobu součástí vede ke neustálému zdokonalování a vytváření nového softwaru. Ten tak poskytuje stále dokonalejší a přesnější informace o chování testované soustavy.



Obr.1 Základní princip řešení pomocí numerických metod [1]

Tato práce je zaměřena na popis základních simulačních programů(ANSYS, Quickfield, MARC) založených na metodě konečných prvků a jejich využití při simulaci dynamických dějů ve tváření. Uvádí základní teorii o mechanických vlastnostech materiálů, která je důležitá pro vytvoření modelu materiálů. Zmiňuje se o vzniku, použití a základní charakteristice metody konečných prvků. Popisuje dvě nejčastěji používané metody pro zjišťování dynamicko-mechanických vlastností materiálů, konkrétně Hopkinsonův a Taylorův test. Tyto metody nám poskytují údaje, které jsou potřebné pro výpočtové modely a simulační programy.



Obr. 2 Příklady úloh řešených MKP [2]

2. Základní pojmy

Tato kapitola se zabývá základními pojmy, které souvisejí s danou problematikou. Jedná se o pojmy jako počítačová simulace, modelování, model výpočtu, napětí a další.

2.1 Počítačová simulace [3]

Díky moderním počítačům, které jsou dnes snadno dostupné a výkonné, je možno provádět za pomoci vhodného softwaru nejrůznější simulace. Simulace je v matematice a kybernetice definovaná jako vědecká metoda, během které se zkoumají vlastnosti určitého systému pomocí experimentů s jeho matematickým modelem.

2.2 Modelování [3]

Modelování patří k tradičním postupům v některých technických disciplínách, například v kybernetice nebo v teorii automatického řízení. S rozvojem levných a dostupných počítačů v poslední době proniklo počítačové modelování do většiny technických věd a stalo se důležitou metodou i v biologii, metrologii, geologii a dokonce v ekonomii a ve vědách sociálních.

Hlavní praktickou výhodou modelování je možnost pomocí změny vstupních parametrů vyřešit úlohy, které nemají analytické řešení, nebo ověřit vlastnosti nákladných zařízení před jejich fyzickou realizací (např. složité integrované obvody, části letadla nebo atomové bomby). Simulační modely se používají také jako součást trenažérů nebo počítačových her. Biologické modely mohou zabránit některým pokusům na zvířatech. Pro modelování v různých oborech byla vyvinuta řada softwarových balíčků, k nejznámějším patří například: -Matlab Simulink - pro modelování dynamických systémů

-Spice - pro elektrické obvody.

V minulosti se používaly pro modelování analogové počítače (výpočet diferenciálních rovnic s počátečními podmínkami) nebo simulační programovací jazyky, jako např. Simula (systémy s diskretními událostmi) nebo CSSL (Continuous System Simulation Language).

2.3 Model výpočtu [3]

Prvním krokem při počítačovém modelování bývá sestavení matematického modelu zkoumaného systému. Model může být sestaven buďto teoreticky ze základních fyzikálních vlastností systému nebo empiricky z naměřených hodnot.

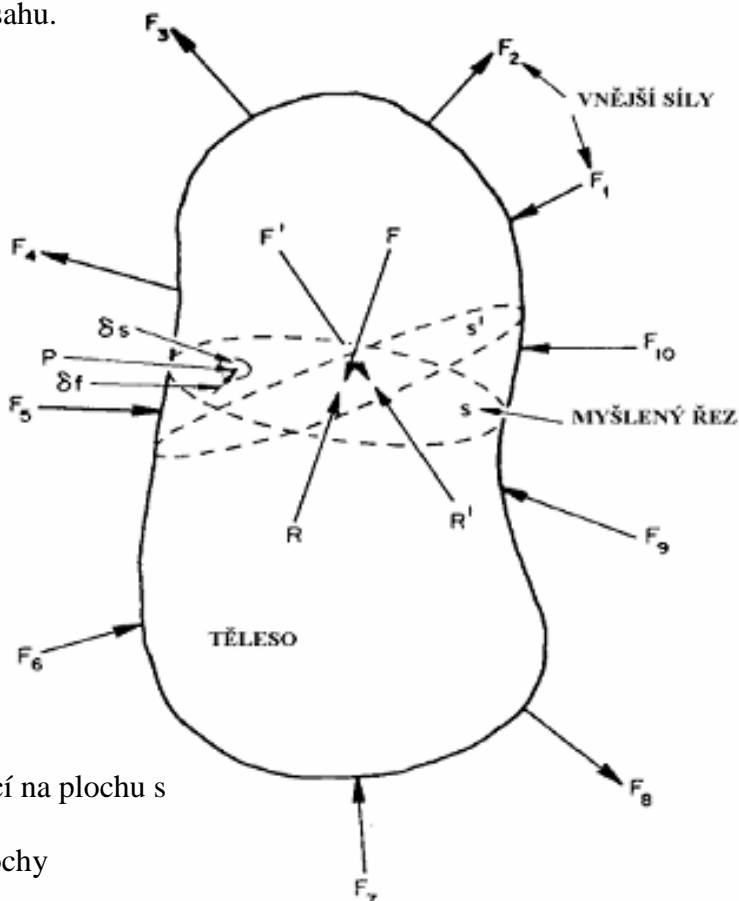
Sestavováním modelů z empirických hodnot se nazývá identifikace systémů. Model výpočtu musí vhodně charakterizovat závislost výstupů systémů na jeho vstupech. Modely fyzikálních soustav jsou obvykle sestaveny jako soustavy několika diferenciálních rovnic. V kybernetice nebo elektrotechnice jsou to obvykle obyčejné diferenciální rovnice, jiné obory pracují také s parciálními diferenciálními rovnicemi. Rovnice obvykle upravujeme do některé z kanonických forem. V kanonické formě může být objekt jednoznačně prezentován. V jiných disciplínách můžeme použít pro popis systému diferenční rovnice, stochastické diferenciální rovnice, přenosové funkce v Laplaceově transformaci nebo zcela jiný matematický aparát. Model ale málokdy dokáže popsat reálné chování (např. materiálu)

dostatečně přesně. Výsledek jsme např. získali s použitím zjednodušujících předpokladů. Při modelování je proto zásadní znát omezení použitého modelu a nevyvozovat z dosažených výsledků chybné závěry. Rovnice matematického modelu řešíme vhodnou numerickou metodou. Vypočtené výsledky by měly být ve shodě s reálnými.

2.4 Napětí [4]

Tváření je technologický proces, v němž je polotovar proměněn ve výrobek s přesně definovaným tvarem, rozměry, přesností a tolerancemi, vzhledem a vlastnostmi. Děje se tak plasticou deformací vyvolanou vnějšími silovými a teplotními účinky. Vnější silové účinky vyvolávají uvnitř tvářeného materiálu napjatost v bodě tělesa. Vnější síly působící na těleso (a snažící se jeho elementy vyvést ze stavu rovnováhy - deformovat je) mohou působit na částice bezprostředně nebo nepřímo. Bezprostředně na částice působí tzv. objemové síly na např. setrvačné síly při tváření vysokými energiemi a rychlostmi. Nepřímo jsou materiálu předávány prostřednictvím souhrnu vazeb, zpravidla v kontaktu materiál-nástroj (nástroj může také být nahrazen okolním prostředím, například tlakovým médiem). Z hlediska účinku se vnější síly dělí na aktivní a pasivní. I síly pasivní (tření) mají aktivní účinek na průběh plasticke deformace. Podle časového průběhu se síly dělí na staticky stálé a proměnné a dynamické. Účinek vnějších sil vyvolává v materiálu reakci v podobě sil vnitřních, jimiž na sebe vzájemně částice působí. Zóna vzájemného působení částic nepřevyšuje rozměr atomů a molekul tělesa, proto lze pro inženýrské výpočty uvažovat, že vnitřní síly působí v kontinuu (spojitém prostředí), přerušovaném jen strukturálními nesourodostmi velkého rozsahu.

Definice napětí:



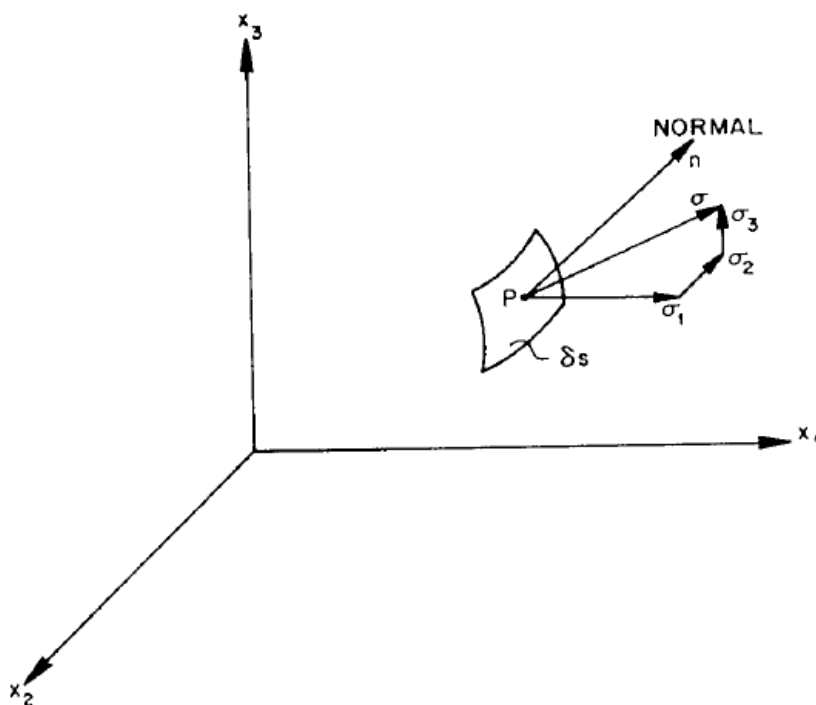
F_1 - F_{10} .. vnější síly
 F síla působící na plochu s
 R reakce
 δs element plochy

Obr. 3 Těleso v rovnováze, zatížené vnějšími silami

Účinek vnitřních sil lze studovat metodou myšleného řezu. Uvažujme těleso v rovnováze zatížené vnějšími silami (objemové síly jsou zde zanedbány) Obr. 3 Je-li jeho část, řezem v uvažované ploše S , oddělena, musí být účinek na ní přiložených sil (v zájmu zachování rovnováhy sil i momentů) nahrazen účinkem vnitřních sil působících v rovině S . Vnitřní síly vztažené na element plochy δs v okolí bodu P jsou definovány jako napětí σ v bodě P .

$$\sigma = \frac{\delta F}{\delta S} \quad (1)$$

Vektor napětí σ má obecně libovolný sklon k ploše δs a lze rozložit do 3 složek σ_1 , σ_2 , σ_3 rovnoběžných s osami kartézské soustavy x_1 , x_2 , x_3 . Poloha plochy δs je charakterizována normálou popsanou směrovými kosiny α_1 , α_2 , α_3 .



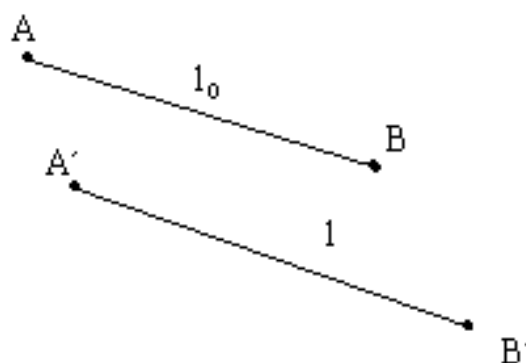
Obr. 4 Složky vektoru napětí

- n normála
- σ vektor napětí
- σ_1 , σ_2 , σ_3 složky vektoru napětí
- δs element plochy

Jsou-li složky napětí definovány v libovolné rovině každého bodu tělesa je plně definován napěťový stav neboli napěťové pole v tělese. Často je výhodné rozložit napětí do plochy, ve které působí a do normály k ní na napětí tečné T a normálové N , jak ilustruje obr. 4.

2.5 Deformace [4]

Deformace je další základní pojmem ve tváření. V průběhu deformace tělesa se přemísťují jeho jednotlivé body, deformace je definována v těchto přemístěních, přičemž je vyloučen efekt přemísťování tuhého tělesa, jak je tomu v mechanice.



Obr. 5 Schéma k definici deformace

Poměrná deformace (v pružnosti označována jako řecké epsilon ε) je definována jako:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Pro velké deformace navrhl Ludvik tzv. skutečnou (logaritmickou nebo přirozenou) deformaci :

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (3)$$

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4)$$

Výhody ε :

1. Pro ekvivalentní deformaci v tahu a tlaku je identická kromě znaménka
2. Aditivnost
3. Vyjádření zákona zachování objemu během tváření:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (5)$$

Jiná vyjádření deformace:

Vedle výše uvedených ε -Lagrangeovy a ε -logaritmické se používá i dalších vyjádření deformací:

$$\text{Eulerovy } \varepsilon_E = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6)$$

$$\text{Lagrangeovy tensorové } \varepsilon_L = \frac{l^2 - l_0^2}{l_0^2} \quad (7)$$

$$\text{Eulerova tensometrická } \varepsilon_{ET} = \frac{l^2 - l_0^2}{l^2} \quad (8)$$

$$\text{Kombinované } \varepsilon_K = \frac{l^2 - l_0^2}{2 \cdot l \cdot l_0} \quad (9)$$

Homogenní a nehomogenní deformace:

U homogenní deformace musí být zachována geometrická podobnost tělesa před a po deformaci, to je:

- rovinné, rovnoběžné řezy před i po deformaci rovinné a rovnoběžné
- rovnoběžné hrany kolmé na tyto řezy i po deformaci rovnoběžné

Nemá-li deformace tyto znaky, nemůžeme ji považovat za homogenní.

2.6 Přetvárný odpor [4]

Přetvárný odpor materiálu je vlastnost materiálu vzdorovat plastické deformaci. Mírou této vlastnosti je napětí. Jednotkou 1Pa (N/m²).

Přirozený přetvárný odpor je funkcí :

- materiálu - chemického složení
- struktury
- teploty
- stupně deformace
- rychlosti deformace

Přetvárný odpor závisí navíc na :

- napjatosti v bodě
- tření

2.7 Rychlost deformace

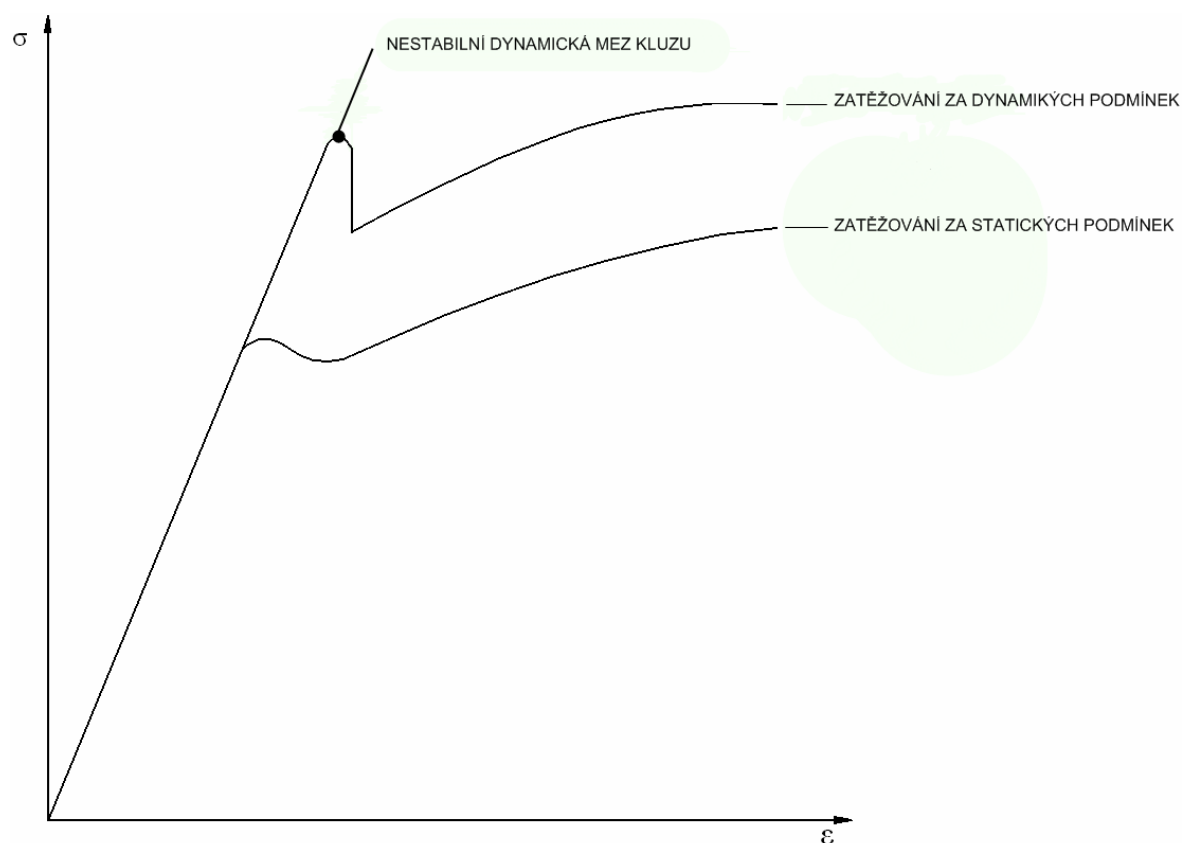
Při tváření se pohybuje nástroj určitou rychlostí, která je závislá na druhu použitého stroje (hydraulický lis, mechanický lis, buchar...). Změna logaritmického přetvoření za časovou jednotku je definována vztahem:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v}{h} \quad (10)$$

v Okamžitá rychlost pohybu nástroje

h Okamžitá výška

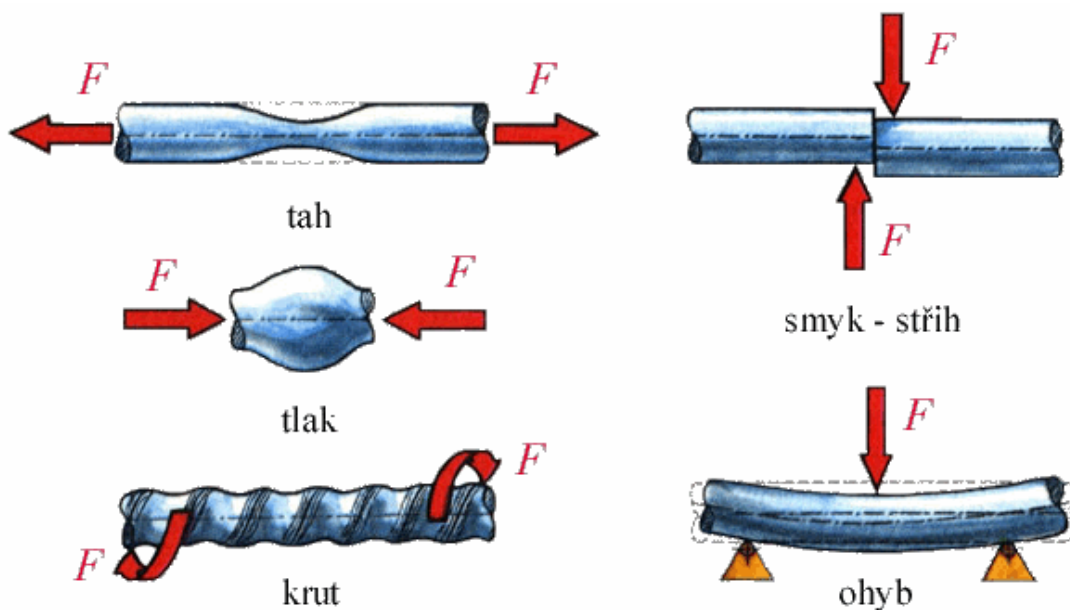
Rychlost přetvoření je rychlost, kterou se k sobě blíží dva průřezy tvářeného kovu vzdálené od sebe o jednotku délky. Rychlost přetvoření je tedy závislá nejen na rychlosti nástroje, ale na stlačované výšce.



Obr. 6 Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti materiálu

3. Mechanické vlastnosti [5]

Materiály jsou při zpracování i při používání vystaveny různému namáhání, jako je tah, tlak, krut, střih a ohyb (obr. 7). Tato jednotlivá namáhání obvykle nepůsobí samostatně (jednotlivě), ale v různých kombinacích. Materiál je tedy vystaven složenému namáhání. Například materiál je namáhán současně tahem, ohybem i krutem.



Obr. 7 Základní druhy namáhání materiálu

F Síla

V závislosti na typu technologie je žádoucí aby materiál buďto odolával nebo neodolával těmto namáháním. To určují vlastnosti materiálu jako pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost, aj.

Na mechanické vlastnosti materiálů má značný vliv také teplota. Při určitých teplotách se mění krystalická struktura materiálů, a tím se mění i jejich mechanické vlastnosti. Tvářením kovů za studena se deformují krystalické mřížky a vzniká v nich vnitřní pnutí. Tím se zvětšuje jejich pevnost a zmenšuje tažnost.

Druhy zkoušek mechanických vlastností materiálů

Mechanické vlastnosti materiálů budou uvedeny zároveň s popisem jejich zkoušek. Těmito zkouškami se totiž získávají údaje nutné pro návrh tvaru, rozměrů a materiálů strojních součástí. Z hlediska působení síly na zkušební těleso rozdělujeme mechanické zkoušky takto:

Statické zkoušky

- při nichž zatížení zvětšujeme poměrně zvolna. Působí obvykle minuty, při dlouhodobých zkouškách dny až roky.

Dynamické zkoušky

-rázové a cyklické, při kterých působí síla nárazově po zlomek sekundy. Při cyklických zkouškách (tzv. zkoušky na únavu materiálu) se proměnné zatížení opakuje i mnoha cykly za sekundu až do mnoha milionů jejich celkového počtu.

Zvláštní technické zkoušky

- jejichž údaje je možno považovat za směrné, neboť výsledky zkoušek zde závisí na mnoha vedlejších činitelích. Z těchto zkoušek jsou nejdůležitější zkoušky tvrdosti.

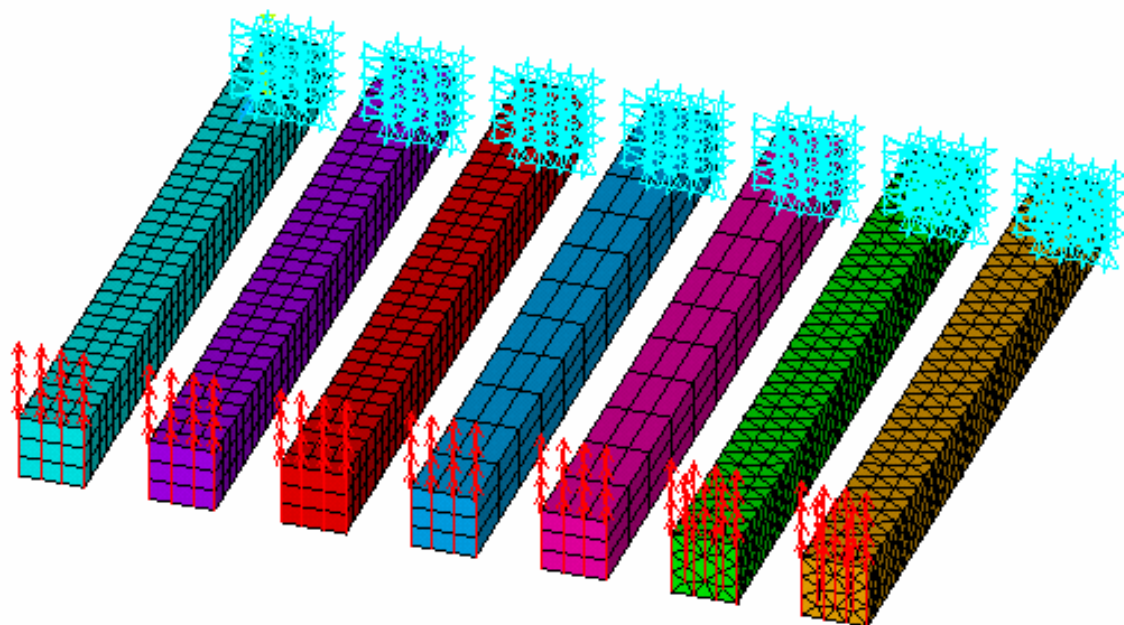
Zkoušky za normálních, vysokých a nízkých teplot

- dělíme podle teplot, při kterých zkoušky provádíme.

Mechanické zkoušky většinou neprovádíme na součásti samé, ale na zvláštních vzorcích (nejčastěji ve tvaru tyčí) zhotovených buď přímo ze součásti, nebo z téhož materiálu. Podrobné údaje o mechanických zkouškách materiálů lze nalézt v příslušných normách.

4. Metoda konečných prvků (MKP) [2]

Metoda vznikla v období kolem roku 1956 ve výzkumném ústavu aeronautické a kosmické mechaniky v Ohio, USA (Wright Paterson Air Force Base). Výzkumný tým byl veden prof. R.W. Cloughem a spolupracovali zejména R.L. Melosh, H.C. Martin, J.L. Tocher a další. Výzkum a vývoj uvedené numerické metody vyvolal striktní požadavek programu Apollo v oblasti vývoje a konstrukce nosných raket. V daném čase a při známém objemu financí (3 miliardy dolarů) se po rozboru zjistilo, že se pomocí experimentu nedá úkol splnit. Zbyla jediná cesta a sice vývoj takové numerické metody, která by výpočty potřebné pro projekty nových typů raket a dalších systémů projektu Apollo zvládla. Výsledky výzkumu byly dále intenzivně využívány na uvedené vojenské základně při projektech letadel, ponorek, raket všech typů, atd. Tato skutečnost způsobila utajení detailů metody tak, že programy a teoretické články ležely nejméně deset roků ve vojenských trezorech. První konference v Ohio (1965 a 1968) poskytly jen kusé informace. Další vývoj byl pak často poznamenán četnými duplicitami v odvození základních "prvků" metody (uvádí se, že deskový trojúhelníkový prvek odvodilo na sobě nezávisle aspoň 7 autorů). Je zajímavé, že inženýři s metodou dlouhé roky úspěšně počítali, než matematikové dokázali konvergenci metody a vlastně posvětili desetileté výpočtářské úspěchy. V civilním sektoru se nejbouřlivěji metoda konečných prvků rozvíjela v letech 1965-1975. Prvním propagátorem a neochvějným zastáncem metody byl v ČSFR prof. V. Kolář, DrSc. z Brna, který také dosáhl značného mezinárodního uznání za programy řady NE. Pomocí MKP se dnes řeší celá řada úloh, jejichž realizace nebyla dosud možná a to nejen v oblasti mechaniky spojených těles či soustav. Svou obecnou matematickou formulací umožňuje MKP řešit problém: mechaniky hornin, proudění kapalin a plynů, šíření tepla a záření, stacionárních a nestacionárních elektromagnetických polí atd. Dokonce jsou známy pokusy o řešení sociologických úloh a modelování ekonomických problémů. O MKP má smysl hovořit pouze v souvislosti s nasazením na číslicových počítačích - směle se dá říci, že metoda je produktem doby moderních počítačů. V současné době jsou to pro zajímavost vědecko-technické výpočty meteorologů, které mají největší požadavky na velikost a rychlost počítačů tak, aby předpověď počasí pro celou zeměkouli byla vypočítána do dvou hodin po shromáždění naměřených dat.



Obr. 8 Typy konečných prvků

4.1 Základní charakteristika metody [2]

MKP je numerická metoda pro získání nejpřesnějšího řešení široké třídy inženýrských úloh. Součástí výpočtu má být vždy odhad chyb řešení. Větší část konkrétních inženýrských problémů není analyticky řešitelná, jsou to jen velmi jednoduché případy. Bez užití moderních metod se dosud při řešení úloh praxe postupuje tak, že řešený mechanický systém se výrazně zjednoduší. Obvykle jde o takové zjednodušení, aby výsledky mohly být porovnávány se známými řešeními uvedenými v tabulkách, katalozích atd.

Používání MKP se rozšířilo v praxi spolu se vzrůstajícími počty 16-ti bitových počítačů. Podobně jako u metody sítí dostáváme řešení přibližných hodnot neznámých veličin konečného počtu neznámých parametrů. Postup, při němž se vybere jistý počet těchto parametrů, se nazývá diskretizace. Těleso (příp. soustava těles) se nahrazuje odpovídající soustavou menších částí (prvků). Namísto řešení problému celého tělesa je problém formulován pro jeho jednotlivé části, v nichž jsou neznámé funkce (např. deformace) přibližně popsány jen malým počtem parametrů ve zvolených bodech (uzlech). Dále se systematicky "zkompletuje" řešení pro celé těleso.

V současnosti je MKP široce a podrobně rozpracovávaný vědní obor obsahující tyto části:

- a) **teoretická**- formulace variačních principů, odvozování vztahů pro různé typy prvků atd.
- b) **matematická** - problematika vhodných numerických metod, výběr algoritmů, důkazy existence a konvergence řešení, odhad chyby řešení atd.
- c) **počítačová** -
 - 1) preprocessing - generování vstupních dat, grafické zobrazení členění, vstupní data, okrajové podmínky, zatížení, opravy a úpravy dat atd.
 - 2) processing - výpočet matic prvků, sestavení matic celého systému, sestavení maticových rovnic a jejich řešení atd.
 - 3) postprocessing - výpočty závislých parametrů, výstupní soubory, grafické znázornění výsledků, výstupy výsledků na periferie atd.

4.2 Použití MKP [2]

MKP umožňuje řešit kvalitativně nové úlohy (jak rozsahem, tak obsahem). Dnes jsou vyvinuty stovky typů konečných prvků a na světě existují desítky celosvětově známých programových systémů (ANSYS, APPLE-SAP, ASAS, ASKA, BEASY, COSMOS, CASTEM, DIAL, FORMFEM, MARC, MSC/NASTRAN, PAFEC, SAP7, SYSTUS, SYSNOISE, TITUS, TPS10...).

5. Systémy a prostředky FEA – simulace [6]

Pro účely simulací a modelování procesů plastické deformace se obecně naskýtá řada možných systémů CAD (Computer Aided Design) a FEA (Finite Element Analysis).

V první řadě pro modelování a tvorbu geometrických dat je k dispozici několik verzí produktu AutoCAD. Výstupy z těchto programů jsou geometrickým modelem pro všechny další systémy analýzy a simulací. Další okruh CAD – modelování naplňuje hierarchický klasifikační systém I-DEAS, který kromě geometrické specifikace umožňuje i tvorbu knihoven již vytvořených modelů, zejména knihoven výrobních způsobů a jejich analýz. IDEAS obsahuje i modul, který dovoluje pevnostní výpočty na vytvořených modelech a dovoluje vstup a výstup analýz a simulací pro ostatní FEA i CAD - systémy.

Systémy na bázi metody konečných prvků jsou v drtivé většině složité programové soubory, které jsou strukturovány do relativně samostatných modulů, jejichž rozsah klade vysoké nároky na výkon výpočetní techniky. FEA - systémy lze dle rozsahu, zaměření a struktury rozdělit do dvou skupin:

- univerzálních: ANSYS, Quickfield, MARC
- speciálních: FORM-2D, FORMFEM

5.1 Univerzální systémy [6]

Skupinu tvoří velmi rozsáhlé a komplikované systémy analýzy velmi širokého rozsahu fyzikálních jevů (mechanika, termomechanika, hydromechanika a elektromagnetické jevy). Základem těchto systémů jsou vysoce sofistikované modely aproximací fyzikálních veličin. Zpravidla umožňují velmi složitým a vývojově přístupným způsobem zadávání geometrických, materiálových a mezních dat potřebných pro vlastní analýzu. Sem lze zařadit systémy ANSYS a MARC, které pracují na platformách výpočetní techniky DOS, Windows, Linux a UNIX.

5.1.1 ANSYS [6]

Pro účely výpočtů pružně-plastických deformací je k dispozici v dnešní metodicky nejpropracovanější systém ANSYS firmy Swanson Analysis Systems, Inc. USA. Program ANSYS se prodává v nejrůznějších verzích. Pro potřeby analýz procesů malých plastických deformací a pro konstrukci tvářecí techniky jde o produkt velmi vhodný, neboť umožňuje kontrolovat deformaci soustavy více těles včetně přestupu tepla a tvorby trvalých deformací.

Pro modelování geometrie analýzy lze využít vnitřní grafický editor. Pro vstup složitějších tvarů lze využít možnosti vstupní konverze některých vektorových grafických formátů ze systémů CAD podle platformy operačního systému. Zadávání materiálových vlastností lze provádět v nejrůznějších kombinacích. Pro plastické deformace je kromě základních veličin modulů pružnosti, Poissonovy konstanty a hustoty rozhodující přirozený přetvárný odpor. Vstup celé skupiny materiálových dat lze uskutečnit jako teplotní funkci, popř. v závislosti na rychlosti deformace.

Nastavování průběhu výpočtu a specifikace jeho podmínek je umožněno rovněž velmi podrobně a v široké škále kombinací. Zejména se jedná o kontakt a interakci jednotlivých těles soustavy mezi sebou a s okolím. Důležitou skupinu specifikací tvoří nastavování výstupních dat. Výsledky lze získat po skončení výpočtu v podobě grafických obrazů rozložení všech složek veličin zúčastněných na modelu. Další formou výstupů jsou tabelární soustavy souřadnicových veličin a dále souborných dat, jakými jsou např. reakce sil a energií, které lze v rámci pracovního cyklu modelu sestavovat do grafů či tabulek.

Používání systémů ANSYS vyžaduje pokročilé znalosti teorie konečných prvků. Vyplývá to z nutnosti podrobného nastavování druhů prvků, rozsahu a přesnosti jednotlivých matic modelu. Výhodou je velmi přesná specifikace změn probíhajících v analyzovaném modelu a možnosti přímého ovlivňování přesnosti výstupních dat. Nevýhodou jsou již zmíněné požadavky na znalosti uživatele.

5.1.2 Quickfield [6]

Program Quickfield je zaměřen na řešení dvojrozměrných, teplotních a deformačních polí. Uvedená deformační pole umí Quickfield řešit i jako slabě sdružené úlohy- tzn. Jednotlivé moduly jsou mezi sebou provázány tak, že výsledky řešení jednoho z polí lze použít jako vstupní veličiny pro výpočet jiného fyzikálního pole (např. Lze sledovat rozložení elektromagnetického pole a zároveň jeho teplotní a deformační účinky). Program provádí řešení pomocí metody konečných prvků a využívá nejmodernějších optimalizovaných algoritmů.

Program pracuje v prostředí MS Windows. Vlastní ovládání programu je intuitivní a jednoduché. Program klade pouze malé nároky na uživatele, program jej vede od počáteční fáze zadávání vstupních dat až po získání výsledků.

5.1.3 MARC [6]

MARC je modulový nelineární systém firmy MARC Analysis Research Corporation, USA. Plně zahrnuje přednosti produktů ANSYS a dále je doplňuje. MARC je velmi výkonný systém pro řešení velmi široké škály fyzikálních jevů. Samozřejmě řeší lineární pružné úlohy. Lze jej používat především pro nelineární pružně-plastické simulace, velké deformace, tuho-plastické a pružně-plastické tváření kovů, pro řešení creepu, viskoelastické a viskoplastické úlohy a pro kontaktní úlohy. Je vhodný i pro lomovou mechaniku, dynamiku, přestup tepla, hydromechaniku i pro elektromagnetismus apod.

Obsluha systému vyžaduje středně pokročilé znalosti teorie konečných prvků. MARC je prvotně určen pro řešení 3D nelineárních modelů velkých změn. Velmi bohatá je šíře okrajových kontaktních podmínek simulací. Pro přesné modelování má MARC k dispozici knihovnu 130 prvků, jejichž strukturu lze během procesu adaptivně upravovat podle nastaveného modelu aproximace. MARC obsahuje 40 rozdílných materiálových modelů podle typu řešené úlohy. Rozsáhlá knihovna obslužných funkcí umožňuje snadné a úplné zadávání podmínek a parametrů řešených simulací.

5.2 Speciální systémy [6]

Do této skupiny patří jednodušší systémy, které jsou zpravidla zaměřeny na užší skupinu fyzikálních jevů nebo jsou omezeny uživatelským zaměřením. V daném případě jde o programy, které dovolují analyzovat tvářecí procesy jednodušeji, z hlediska uživatele přístupněji a s ohledem na výpočetní techniku i rychleji, při nižších nárocích na její výkon. Sem patří systémy FORM-2D a FORMFEM, které využíváme pro simulaci kvazistatických dějů.

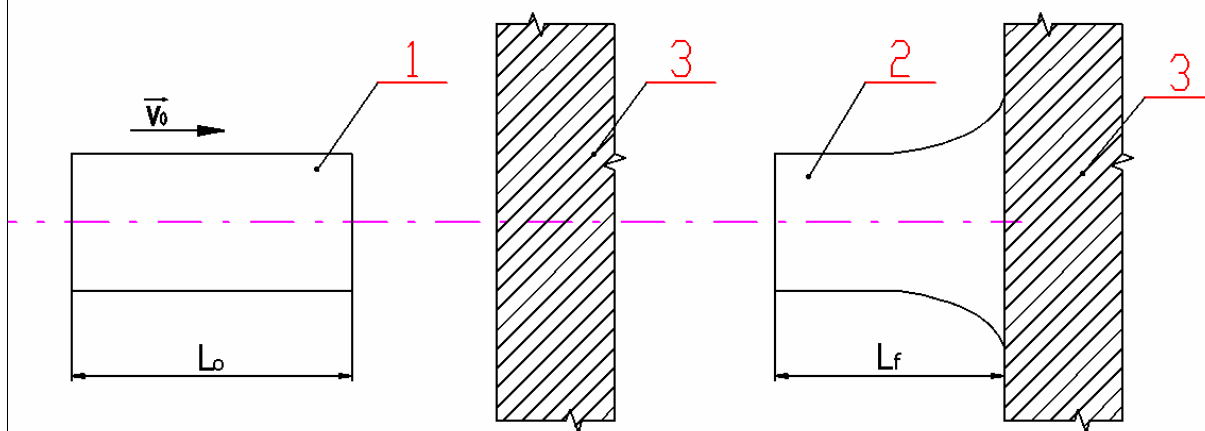
6. Metody zjišťování mechanických vlastností materiálů za dynamických podmínek zatížení [7]

Praktický význam těchto metod spočívá v získávání údajů o tvářených materiálech za vyšších rychlostí deformace, které jsou potřebné do výpočtových modelů a pro simulační programy tvářecích dějů.

Pro střední rychlosti zatěžování se zpočátku využívala experimentální zařízení ve tvaru různě upravených kladiv, padostrojů a jiných typů běžných zkušebních strojů. U těchto metod byla obtížná interpretace poskytnutých výsledků, což postupně vedlo k vývoji metod vycházejících ze sledování šíření vln tyčemi kruhového průřezu. Pro vysoké rychlosti deformace je to např. metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče. Existuje celá řada dalších testů, dále jsou uvedeny pouze ty, které jsou k dispozici na VUT FSI v Brně. Informace o dalších zkouškách lze nalézt v odborné literatuře.

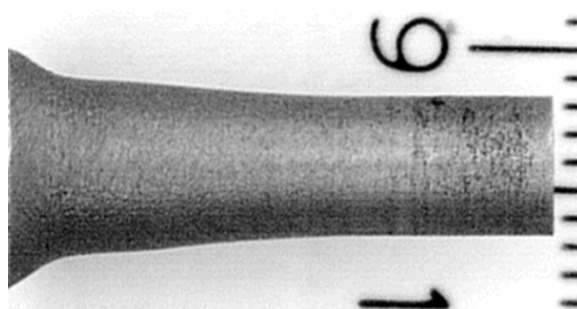
6.1 Taylorův test [7]

Urychlený válcový vzorek dopadá rychlostí v_0 na tuhou desku a dochází k jeho deformaci. Při nárazu uvažujeme desku jako dokonale tuhou. Vzorek má obvykle rozměry: (ϕ 5-25)mm. Tvar zdeformovaného vzorku se zaznamená speciální kamerou. Cílem počítačové simulace pomocí speciálního softwaru je získání co nejlepší shody tvaru obrysu.



Obr. 9 Průběh Taylorova testu

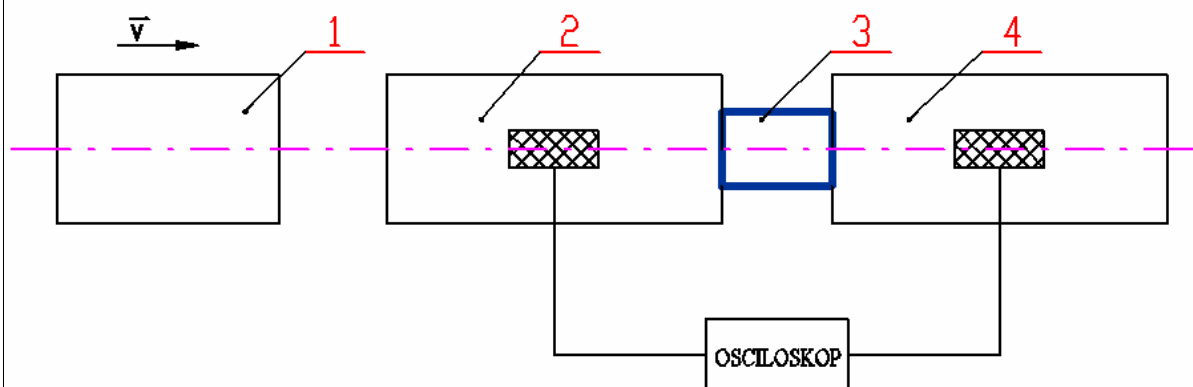
- 1 vzorek před dopadem
- 2 vzorek po dopadu
- 3 deska



Obr. 10 Vzorek po dopadu nasnímaný kamerou [8]

6.2 Hopkinsonův test [7]

Tato metoda je založena na teorii jednorozměrného šíření napěťové vlny. Razník urychlený v hlavní kanónu dopadá na vstupní tyč, toto vyvolá kompresní elastický pulz. Tento tzv. zatěžující pulz se šíří vstupní tyčí až na rozhraní vstupní tyč-vzorek. Zde se část pulzu odrazí, jako pulz odražený, a část prochází skrz přechovaný vzorek jako pulz prošlý do tyče výstupní. Pulzy jsou zaznamenány pomocí osciloskopu a následně vyhodnoceny.



Obr. 11 Schematické uspořádání Hopkinsonova testu.

- 1 razník
- 2 vstupní tyč
- 3 vzorek
- 4 výstupní tyč

7. Konstitutivní rovnice [9]

V současnosti existuje velké množství rovnic, které úspěšně vystihují chování materiálu v závislosti na teplotě i rychlosti deformace. Parametry těchto rovnic získáváme simulací experimentů ve speciálních softwarech.

Pro nízké(a konstantní) rychlosti deformace je udáván vztah:

$$\sigma = \sigma_0 + \kappa \cdot \varepsilon^n \quad (11)$$

σ_0 ... mez pružnosti

κ konstanta

ε poměrná deformace

n koeficient zpevnění

Vliv teploty na přetvárný odpor je popsán vztahem:

$$\sigma = \sigma_R \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_m}{T_m - T_R} \right)^m \right] \quad (12)$$

T_m ... teplota tavení

T_R ... referenční teplota při σ_R

σ_R ... referenční napětí

T teplota pro kterou je počítáno σ

7.1 Experimentální ověření platnosti konstitutivních rovnic [9]

Konstitutivní rovnice obsahují určitý počet parametrů. Tyto parametry jsou experimentálně určeny v testech, které se provádí v určitém rozsahu teplot a rychlostí deformace. Ve chvíli, kdy jsou parametry určeny, je vhodné potvrdit konstitutivní rovnici porovnáním její předpovědi s výsledkem experimentu. Pro tyto experimenty je nejvhodnější Taylorův test, protože poskytuje široký rozsah plastických deformací a rychlostí deformace.

Typ konstitutivní rovnice	počet parametrů
Khan-Huang-Liang (KHL)	6
Johnson-Cook	5
Klopp-Clifton-Shawki	4
Hoge-Mukherjee	4
Campbell	4
MTS	2-4
Zerilli-Armstrong	5

Tab. 1 Typy konstitutivních rovnic a počet jejich parametrů

Na počtu parametrů závisí přesnost konstitutivních rovnic, zároveň mají tyto parametry vliv i na složitost jednotlivých rovnic. Díky svým vlastnostem se velice často používá právě rovnice Johnson-Cookova. Ta není příliš složitá (má 5 parametrů) a zároveň velmi dobře vystihuje chování materiálů.

Zerelli-Armstrongova rovnice

Tato konstitutivní rovnice se srovnává s rovnicí Johnson-Cookovou z pohledu toho, jak odpovídá předpověď profilu Taylorova vzorku. Zerelli-Armstrongova model udává dobrý vztah s výsledky experimentu pro mřížky BCC (Fe) a FCC (Cu). Hlavní výhodou této rovnice oproti Johnson-Cookově spočívá ve fyzikálních procesech uvnitř materiálu. Další výhodou je jednodušší testovací metodika oproti modelu MTS.

Pro materiály mající HCP mřížku je obtížné najít vhodnou konstitutivní rovnici. Chování materiálů s touto mřížkou se svými vlastnostmi pohybuje mezi materiály s BCC a FCC mřížkou. Existují modifikace konstitutivních rovnic, které vystihují chování těchto materiálů. Tyto rovnice lze nalézt v odborné literatuře.

7.2 Johnson-Cookova rovnice [9]

Osvědčený konstitutivní vztah dle Johnson-Cooka pro BCC materiály, který zahrnuje základní fyzikální parametry. Tento konstitutivní vztah je mimo jiné vhodný pro dynamické kompresní testy s vlivem setrvačných sil a mechanických resonancí, dobře predikuje deformační chování ocelí, zvláště při objemovém tváření na tvářecích automatech.

V současnosti patří mezi nejrozšířenější konstitutivní vztahy. V modifikované formě jej lze použít i pro keramické materiály.

$$\sigma = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right) \cdot [1 - (T^*)^m] \quad (13)$$

Zde σ_0 , B, C, n, m, představuje 5 experimentálně a simulací stanovených vstupních parametrů a homologická teplota je definována podílem:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (14)$$

σ_0 mez kluzu stanovená z kvázistatických kompresních testů

B pevnostní parametr

C parametr, který určuje citlivost na rychlost deformace

n koeficient zpevnění

m teplotní koeficient odpevnění

T teplota materiálu

T_0 referenční teplota (teplota okolí) při statické mezi kluzu $\sigma = \sigma_0$

T_m teplota tavení

φ_0 referenční rychlost deformace

φ efektivní logaritmická rychlost deformace (rychlost deformace)

7. ZÁVĚRY

Oblast zabývající se modely materiálů pro simulaci dynamických dějů ve tváření je velice široká a nebylo možné obsáhnout vše v rozsahu bakalářské práce. Úkolem práce bylo provést aktuální literární studie, závěry a zhodnocení metod řešení.

K matematickému popisu chování materiálů slouží konstitutivní rovnice. Těch existuje celá řada. Jednotlivé rovnice se mezi sebou liší zejména počtem parametrů. Ten ovlivňuje složitost rovnic a přesnost předpokládaného chování materiálu. Nejpoužívanější rovnicí je Johnson-Cookova. Tato konstitutivní rovnice má pět parametrů. Není příliš složitá a dobře vystihuje chování materiálů.

V dnešní době, kdy jsou osobní počítače běžně dostupné a dostatečně výkonné, je na trhu celá řada simulačních softwarů, které pracují na principu metody konečných prvků. Jejich ceny se pohybují v řádech několika desítek tisíc korun. Spousta firem též poskytuje nejrozličnější typy školení pro práci s těmito programy. Jejich ceny se pohybují kolem deseti tisíc korun. Simulační software nalezne využití takřka ve všech technických i netechnických vědních disciplínách.

Pro simulování chování materiálů při dynamických dějích je nezbytné získat základní údaje o daném materiálu. To se provádí např. pomocí Hopkinsonova nebo Taylorova testu. Zařízení pro provedení těchto testů jsou k dispozici i na VUT FSI v Brně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KAČOR, Petr. *Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi* [online]. 2003 [cit. 2008-04-14]. Dostupný z WWW: <http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/>.
- [2] HORYL, Petr. *Inženýrské základy MKP*. [s.l.], 200. 31 s. Studijní materiál. Dostupný z WWW: <www.337.vsb.cz/FILES/texty_PDF/Inz_zakl_MKP_2002.pdf>.
- [3] Wikipedia. *Wikipedia* [online]. [2008] [cit. 2008-04-14]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1_simulace>.
- [4] PETRUŽELKA, Jiří, BŘEZINA, Richard. *ÚVOD DO TVÁŘENÍ I*. [s.l.], 2001. 161 s. Dostupný WWW : <www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod_TV1.pdf>.
- [5] KRYŠTUFEK, Pavel. *STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE : Nauka o materiálu* [online]. 1999 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3.htm>>.
- [6] PETRUŽELKA, Jiří, HRUBÝ, Jiří. *Výpočetní metody ve tváření - metoda konečných prvků*. Ostrava : [s.n.], 1997. 177 s. Dostupný z WWW: <www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/AplikaceMKP.pdf>.
- [7] FOREJT, Milan, et al. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY*. Brno : [s.n.], 2003. 83 s. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
- [8] JOPEK, Miroslav. *Zkušební zařízení : Taylorův test* [online]. 2004 [cit. 2008-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.sweb.cz/Jopek.M/Stranky/stranka8.htm>>.
- [9] MEYERS, Marc André. *Dynamic behavior of materials*. New York : John Wiley & Sons, 1994. 668 s. ISBN 047158262X.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
B	Pevnostní parametr	[-]
C	Parametr určující citlivost na rychlost deformace	[-]
F	Síla	[N]
h	Okamžitá výška	[m]
l	Délka	[mm]
L_0	Původní délka	[mm]
m	Teplotní koeficient odpevnění	[-]
n	Normála	[J]
n	Koeficient zpevnění	[-]
R	Reakce	[N]
S	Plocha	[m ²]
T	Teplota	[K]
T_0	Referenční teplota (teplota okolí)	[K]
T_m	Teplota tavení	[K]
T_R	Referenční teplota	[K]
v	Okamžitá rychlost pohybu nástroje	[m/s]
δ_s	Element plochy	[-]
ε	Poměrná deformace	[-]
ε_E	Eulerova deformace	[-]
ε_{ET}	Eulerova tensometrická deformace	[-]
ε_L	Lagrangeova tensorová deformace	[-]
ε_K	Kombinovaná deformace	[-]
ε_X	Poměrná deformace ve směru osy x	[-]
ε_Y	Poměrná deformace ve směru osy y	[-]
ε_Z	Poměrná deformace ve směru osy z	[-]
κ	Konstanta	[-]
σ	Napětí	[N/m ²]
σ_0	Mez pružnosti	[MPa]
σ_R	referenční napětí	[MPa]
φ	Skutečná (logaritmická) deformace	[-]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s]
Zkratka		Význam
3D		Trojrozměrný prostor
BCC (Body Centered Cubic)		Krychlová prostorově středěná mřížka
CAD (Computer Aided Design)		Programy používané pro kreslení a návrh objektů.
FCC (Face Centered Hubic)		Krychlová plošně středěná mřížka
HCP (Hexagonal Close Packed)		Šesterečná těsně uspořádaná mřížka
MKP (FEA- Finite Element Analysis)		Metoda konečných prvků